論　文　の　要　旨

氏　　名　　林　　将　平

論 文 題 目

Crystallization of Amorphous Silicon Films by Atmospheric Pressure Micro-Thermal-Plasma-Jet Irradiation and Its Application to Thin-Film Transistors

（大気圧マイクロ熱プラズマジェット照射によるアモルファスシリコン膜の結晶化及び薄膜トランジスタへの応用）

近年、急速に成長してきたフラットパネルディスプレイ(FPD)の背景には、液晶ディスプレイ(LCD)や有機 EL ディスプレイ(OLED)の画素スイッチングデバイスなどに用いられる薄膜トランジスタ(TFT)の発展がある。これまで LCD のバックプレーンに用いられる TFT のチャネル材料には、大面積に均一形成が可能である水素化非晶質シリコン(a-Si:H)が用いられてきた。しかし、ここ数年におけるスマートフォンやタブレット PC の急激な普及により、FPD の高精細化、低消費電力化が強く要求されており、TFT の高移動度化と低駆動電圧化が重要課題である。また、OLED 応用には特性ばらつきの低減、信頼性向上が不可欠となる。そこで、次世代チャネル材料として有機半導体、酸化物半導体、結晶 Si が注目されており、特に微結晶 Si(μc-Si)や低温多結晶 Si(LTPS)を用いた結晶 Si TFT は、高移動度、高信頼性、CMOS による周辺回路の作製が可能であることから勢力的に研究が進められている。結晶 Si 膜を作製する手法として、低温堆積した a-Si 膜を急速熱処理により結晶化する手法が挙げられる。従来この急速熱処理には、エキシマレーザアニーリング(ELA)が広く用いられており、ナノ秒時間領域の極短時間で a-Si を溶融、固化することで基板への熱的ダメージを抑えつつ、高結晶性 Si 膜の形成が可能である。しかし、装置、ランニングコストが高価であることから大面積化に伴うコストが増大する問題を抱える。また、結晶サイズは数百 nm 程度であり、TFT 特性向上のためには結晶の大粒径化が求められる。そこで、本研究室では大気圧下において高出力可能な熱プラズマジェット(TPJ)を用いた結晶化技術を提案してきた。TPJ は簡単な構造で 1 万度を超える高温の熱流が得られるため、低コスト、高スループットな熱処理が可能である。これまで、TPJ 照射によるアモルファスシリコン(a-Si)膜の固相結晶化(SPC)を報告し、特性ばらつきが小さく電界効果移動度 10 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ 程度の良好な TFT の作製に成功した。この特性は FPD の画素トランジスタとしては十分な性能と言えるが、周辺回路に用いる場合、更に高移動度の TFT が必要であり、チャネル Si 結晶の大粒径化が不

可欠である。そこで本研究では、高密度化したマイクロ TPJ（μ-TPJ）照射により a-Si を溶融し、溶融領域を掃引することで横方向へ大きな結晶成長誘起を試みた。この時結晶化メカニズムを新たな実時間観察手法を用いて詳細に調査した。また、本手法で結晶化した Si 膜をチャネルに用いた TFT を作製することで結晶構造とデバイス特性の関係を明らかにし、高性能デバイス作製を試みた。本論文はこれらの研究成果を基に纏められており、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景について述べる。FPD 及び TFT、a-Si 膜の結晶化技術について纏めた内容を記載する。

第 2 章では、これまで量子半導体工学研究室において開発された TPJ を用いた研究成果について述べる。TPJ 急速熱処理手法は、様々なプロセスに用いることが可能であり、これまで a-Si 膜の結晶化だけでなく、トランジスタのソース、ドレイン領域の不純物高効率活性化やゲート酸化膜の品質改善等多くの研究成果が得られている。本章に記載された実験及び結果は、本研究を行う上で重要な知見である。

第 3～6 章において研究成果について記載する。第 3 章では、TPJ を高密度化した μ-TPJ を形成し、a-Si 膜の結晶化及び結晶化した Si 膜を用いた TFT の特性について述べる。TPJ 噴出孔径の縮小及び電極間距離拡大により形成したμ-TPJ は、従来の 6 倍以上のパワー密度を達成した。このμ-TPJ を a-Si 膜に照射することで結晶化を行い、横方向への長距離結晶成長（高速横方向結晶化, HSLC）の誘起に成功した。HSLC により結晶化した Si 膜をチャネルに用いた TFT は 350 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ の高移動度を達成した。

第 4 章では、μ-TPJ 照射による a-Si 膜の結晶化メカニズムの解明を試みた結果について示す。高速度カメラを用いた実時間直接観察手法を開発し、SPC、HSLC とは異なる新たな結晶化である Leading Wave Crystallization (LWC) を発見した。LWC の結晶成長メカニズムは数値計算により実験結果を再現することで解明された。

第 5 章では、前章で発見した 3 つの結晶化により作製した Si 膜の結晶構造及び TFT 作製による電気特性評価を行った結果を述べる。μc-Si により形成される SPC に比べ LWC 及び HSLC は横方向に大きく結晶成長し、高い結晶性を示した。TFT チャネルサイズに対して十分大きな結晶が形成された結果、LWC 及び HSLC を用いた TFT において単結晶によるチャネル形成に成功した。また、本章では各結晶化 Si 膜の欠陥密度について TFT 特性から詳細に議論する。

第 6 章では、第 4、5 章で得られた結果を基に結晶成長制御手法を提案する。前章において HSLC が最も低欠陥密度であることが明らかになった。しかし、HSLC においては特性劣化の大きな要因となる結晶粒界が樹状に形成され、チャネル領域にランダムに結晶粒界が混入する。そのため TFT 特性のばらつきに大きく影響を及ぼす。そこで結晶粒界を制御する手法として細線状にパターニングした a-Si 膜へのμ-TPJ 照射を行った。その結果、電気的に活性なランダム粒界は細線幅減少に伴い顕著に減少した。また、本手法を用いた TFT を作製し、電気特性評価を行った結果を記載する。